

## 中間貯蔵施設における前処理技術の開発

川口 正人 郷家 光男 横山 勝彦 樋口 義弘 土田 充  
(技術研究所) (土木技術本部) (土木技術本部) (土木技術本部) (エンジニアリング事業本部)

### Development of pretreatment technologies for the interim storage facilities

Masato Kawaguchi, Mitsuo Gohke, Katsuhiko Yokoyama, Yoshihiro Higuchi, and Mitsuru Tsuchida

中間貯蔵施設では、除去土壌を貯蔵する前には大型土のう袋から除去土壌を取り出し、除去土壌中の可燃物を分離した後、放射性物質濃度で分別を行う3つの前処理工程が必要である。この前処理工程のために、ウォータージェット破袋システム、可燃物分離システム、及びセシウム汚染土壌濃度分別システムを開発した。これまでの実証試験より、ウォータージェット破袋システムでは処理能力 300t/h、また、可燃物分離システムでは手選別と同等の分別能力があることを確認した。さらにセシウム汚染土壌濃度分別システムでは、計測誤差 20%以下と既存機よりも向上できた。

The interim storage facilities require three pretreatment steps before storing contaminated soil. The steps are; taking the soil out of flexible container bags, separating combustible materials from the soil, and classifying the soil by the level of the radioactivity concentration. Therefore, we developed a cutting system of flexible container bags by a water-cutter, a separating system for combustible materials, and a sorting system of cesium-contaminated soil. The demonstration tests proved that the treatment capacity of the cutting system is 300t/h, the efficiency of the separating system is equal to manual procedures, and the sorting system can check the soil concentration with the error of 20 % less than that of the existing system.

#### 1. はじめに

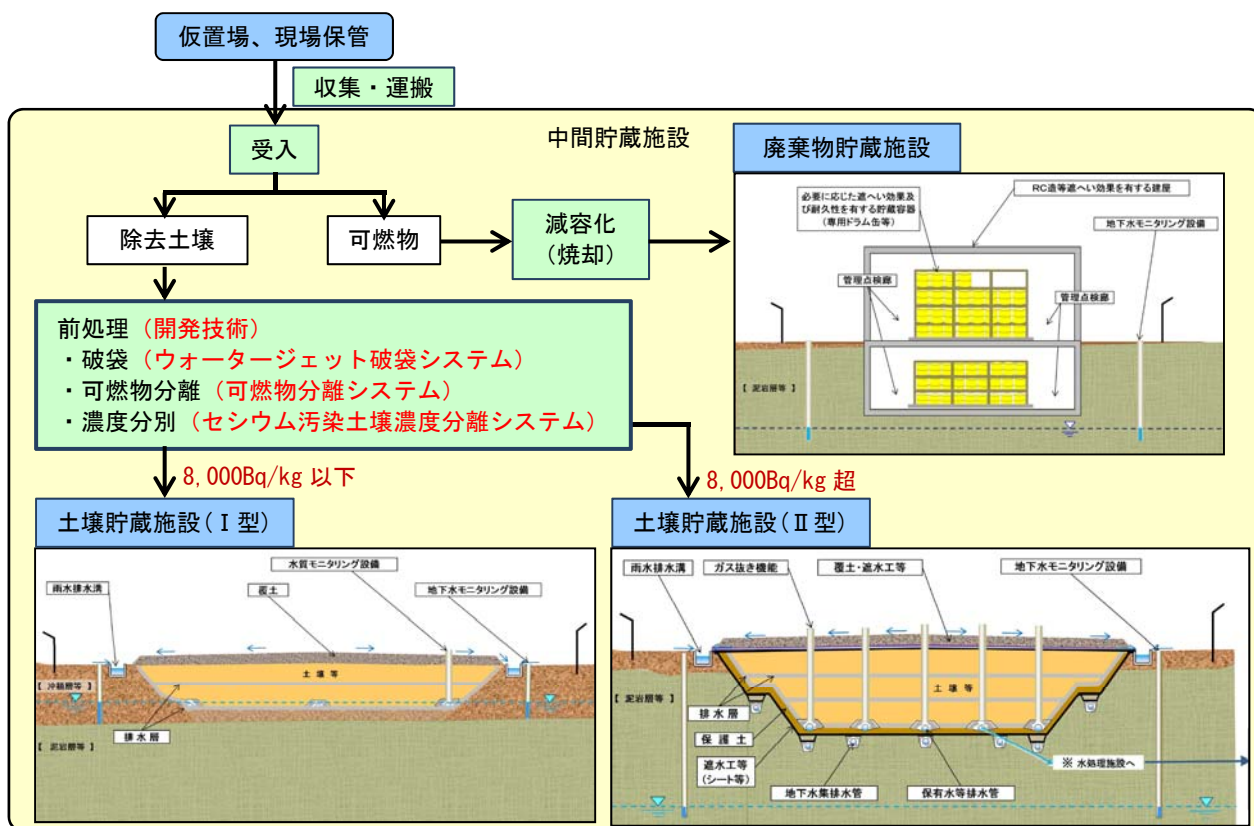
平成 23 年 3 月の東北地方太平洋沖地震に伴う東京電力福島第一原子力発電所の事故によって、大量の放射性物質が環境中に拡散した。そして、土壌等の除染等、環境の汚染による人の健康または生活環境への影響を速やかに低減することのために、「平成二十三年三月十一日に発生した東北地方太平洋沖地震に伴う原子力発電所の事故により放出された放射性物質による環境の汚染への対処に関する特別措置法」(以下、特措法)が公布され、除染作業や廃棄物処理が東北および関東において進められてきた。福島第一原子力発電所が立地しており、汚染の度合いが高く、対策を講ずべき面積の広い福島県では、除染に伴う除去土壌等の発生量が、減容化(焼却)処理を前提とした上でも約 1,600 万~2,200 万 m<sup>3</sup>と膨大な量になると推定されている<sup>1)</sup>。そのため、直ちには最終処分方法が見込めないことから、福島県内に中間貯蔵施設を設置し、除去土壌等を最大 30 年間、集中的に貯蔵・保管する計画となっている。そして、

この期間中に処分方法を決めて、県外に最終処分することになっている<sup>1)~3)</sup>。平成 27 年 1 月までに福島県、大熊町および双葉町は中間貯蔵施設の建設の受入れを容認し、平成 27 年 3 月からは大熊町および双葉町内に散在する仮置場から中間貯蔵施設計画地内に設けられた保管場へのパイロット輸送による除去土壌等の搬入が開始されている。

この中間貯蔵施設への貯蔵対象は、以下のように定義される。

- 除染に伴い発生した土壌等(可燃物は原則として焼却減容化し、焼却灰を貯蔵)
- 特措法に基づく特定廃棄物の内、放射性物質の濃度が 10 万 Bq/kg を超える廃棄物(可燃物は原則として焼却減容化し、焼却灰を貯蔵)

そして、可燃物の焼却灰は廃棄物貯蔵施設に、除去土壌については放射性物質濃度に応じて、8,000Bq/kg 以下は安定型処分場相当の土壌貯蔵施設(I型)に、8,000Bq/kg を超えるものについては管理型処分場相当の土壌貯蔵施設(II型)に、それぞれ貯蔵される予定になっている<sup>1)</sup>。



注) 各貯蔵施設の断面概念図は、参考文献1を引用

図-1 中間貯蔵施設の全体処理フローにおける前処理技術の位置付け

中間貯蔵施設の全体処理フローと今回開発した前処理技術の位置付けを図-1に示す。すなわち、除去土壌等は大型土のう袋に入れられて除染作業場所に一時的に置かれていたり、仮置場に保管されている。これを中間貯蔵施設に収集・運搬した後、大型土のう袋を破袋して中身の除去土壌を取り出す。そして、除去土壌に混入している植物根や葉などの可燃物を分離した後、8,000Bq/kgを閾値として放射性物質濃度別に除去土壌を分別するといった、一連の前処理が必要となっている。

本稿では、中間貯蔵施設の前処理技術であるウォータージェット破袋システム(FXC:フレコンクロスカッター)、可燃物分離システム(PGS:パワーグラインドスクリーン)、およびセシウム汚染土壌濃度分別システム(CSS:セシウム汚染土壌濃度分別システム)の開発の概要について述べる。

## 2. ウォータージェット破袋システム

福島県内の除染に伴う除去土壌等は、大型土のう袋に詰められて仮置場等に保管されている(写真-1参照)。中間貯蔵施設では、これらを破袋して中身を取り出す工程が想定されていることから、放射性物

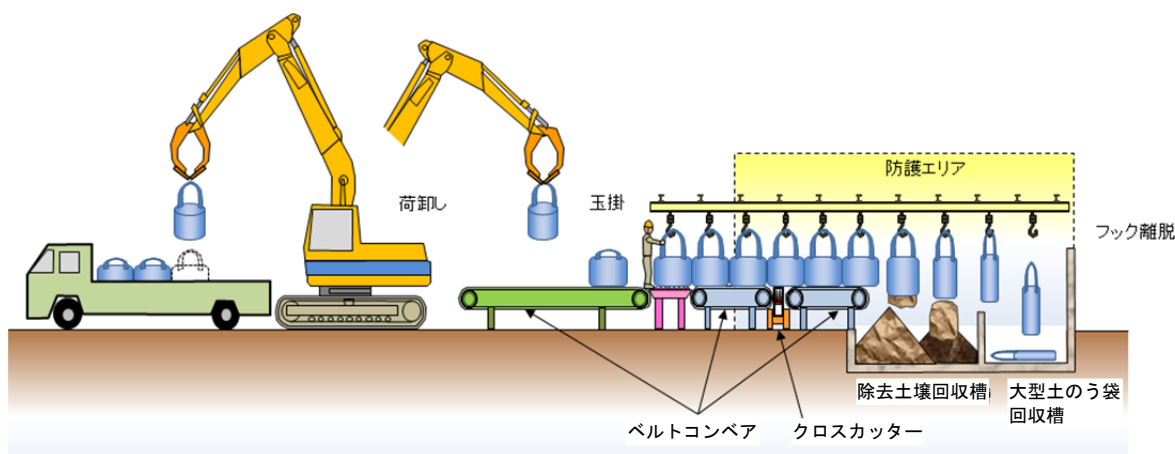


写真-1 除去土壌等を詰めた大型土のう袋

質を含む除去土壌等が充てんされている大量の大型土のう袋を効率良くかつ安全に破袋する技術が求められた。このニーズに対して、袋材に対して様々な破袋方法を試行する切削性能確認試験や、大型土のう袋を丸ごと破碎する大型破碎機の基本性能確認試験等を経て、非接触切削技術であるウォータージェットカッターを破袋方法として選定するに至った。そして、実際の大型土のう袋を破袋するシステムを環テックス(株)、第一カッター工業(株)と共同開発した。

表一 切削性能確認試験と二軸式大型破砕機の基本性能確認試験による破袋方法の比較

破袋方法		袋材のみ切断する技術			丸ごと破砕する技術	
		接触型		非接触型	二軸式大型破砕機	
		ディスクグラインダ、 カッターナイフ	ヒートカッター	ウォータージェットカッター		
評価項目	可燃物 回収性	袋材を確実に分離・回収できるか？	○	○	○	×
	切断・ 破袋能力	内容物に硬質な物（金属片や碎石等）が含まれていても破袋可能か？	△	△	○	○
	維持管 理性	刃こぼれや器具の損傷に対するメンテナンス負担は？	△	△	○	△
	環境影 響性	周辺環境への影響（火災・飛散等）は問題無いか？	○	△	○	○
実証試験結果に対する考察		内容物に硬質な物があつた場合、刃こぼれの恐れがある	袋材が発火する恐れがある	少水量での切削が可能（1L/袋程度） →周辺環境影響は軽微	袋材回収工程が別途必要	



図一 ウォータージェット破袋システムの概念

## 2.1 破袋方法の選定

除染工事における大型土のう袋への除去土壌等の充填では、作業員が手作業で袋を閉じて袋口を絞り、綴じ紐で縛っている。中間貯蔵施設では福島県内各地から大量の大型土のう袋が集められてくるため、充填した手順と逆に、この大型土のう袋を人力で解き、中身を取り出すために転倒させ、袋体のみ引き上げるような方法では作業性が悪く、作業員の放射線被ばくも問題となる。

そこで、運ばれてきた大型土のう袋を破袋して中身のみを取り出す技術が必要と考え、袋材に対して様々な破袋方法を試行する切削性能確認試験を行った。破袋方法としては、カッターナイフ、ディスクグラインダ、ヒートカッター、ウォータージェット

カッター等によるものが考えられ、実際に袋材を切ってみることでそれらの方法の得失を把握した。また、大型土のう袋を内容物もろとも破砕する二軸式大型破砕機についても基本性能確認試験を行った。これらの比較検討結果を表一に示す。

その結果、ウォータージェットカッターが、内容物の硬軟・軽重に係らず、非接触で袋材のみを切断して内容物を速やかに取り出せるために、切削機構に無駄がなく、次工程の分別処理の負担も軽減され、破袋方法として最も優位であると判断した。

## 2.2 ウォータージェット破袋システムの開発

ウォータージェットカッターを用いた大型土のう袋の破袋システムの概念を図一に示す。このシス

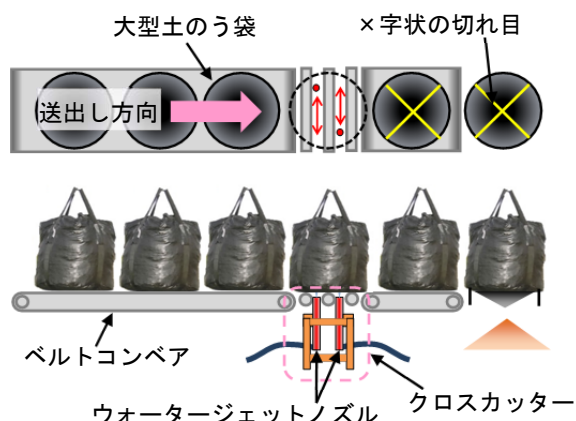


図-3 底面を×字状に切断する仕組み



写真-3 平成26年度技術実証の設備全景



写真-2 大型土のう袋の破袋状況



写真-4 表土剥ぎ取りによる除去土壌の発生状況

テムの中心となるのは、スライド式の2セットのウォータージェットカッターから成る「クロスカッター」と、それを組み込む長さ1m程度のローラーコンベアで構成される破袋機構である。全体としては、この破袋機構と後工程の除去土壌回収槽、破袋後の大型土のう袋回収槽から構成される。

破袋機構の仕組みは、大型土のう袋をベルトコンベアで移動させながら、移動面の隙間に上向きに設置した2セットのウォータージェットカッターを、大型土のう袋通過時に噴射させながら、大型土のう袋の移動方向の直交方向へ互い違いにスライドさせるものである。このような機構で、底面に×字状の切れ目を入れ、底面の切れ目から内容物を自由落下で取り出すことができ、袋材と内容物をきれいに分離することができる(図-3 参照)。

ウォータージェットカッターによる破袋システムを「フレコンクロスカッター：FXC」と名付け、実機開発を進めた。平成25年度の開発では、除染工事で使われている大型土のう袋を用いた試験の結果として、破袋可能な水圧、吐出水量、ノズル先端と大型土のう袋の離隔などの条件を得ることができた。この試験における破袋状況を写真-2に示す。帯状

の吊り紐と袋材が二重、三重と積層になっている部分についてもきれいに切れていることが分かる。

さらに、このウォータージェット破袋システムに関しては、環境省の平成26年度除染技術実証事業に採択され、図-2に示すようなハンガー方式の搬送設備との組み合わせについて技術実証を進めた。実証試験時の設備の全景を写真-3に示す。この実証試験の結果<sup>4)</sup>、搬送設備とウォータージェット破袋システムを組み合わせることによって300t/h(毎分6袋)の連続破袋処理ができることを確認した。また、破袋で使用する切削水の量は1.3L/袋程度であり、これは、対象とする大型土のう袋の体積の0.2%以下と少量であり、かつ、切削水は大型土のう袋内の除去土壌中に吸収されるため、切削水による汚染された排水は生じないことも確認できた。

### 3. 可燃物分離システム

除染工事で発生する除去土壌は、農地、草地、および住宅地等において実施される表土剥ぎ取りなどの作業によって発生する(写真-4参照)。このような除染対象となる表土は、雑草や灌木を除草した後

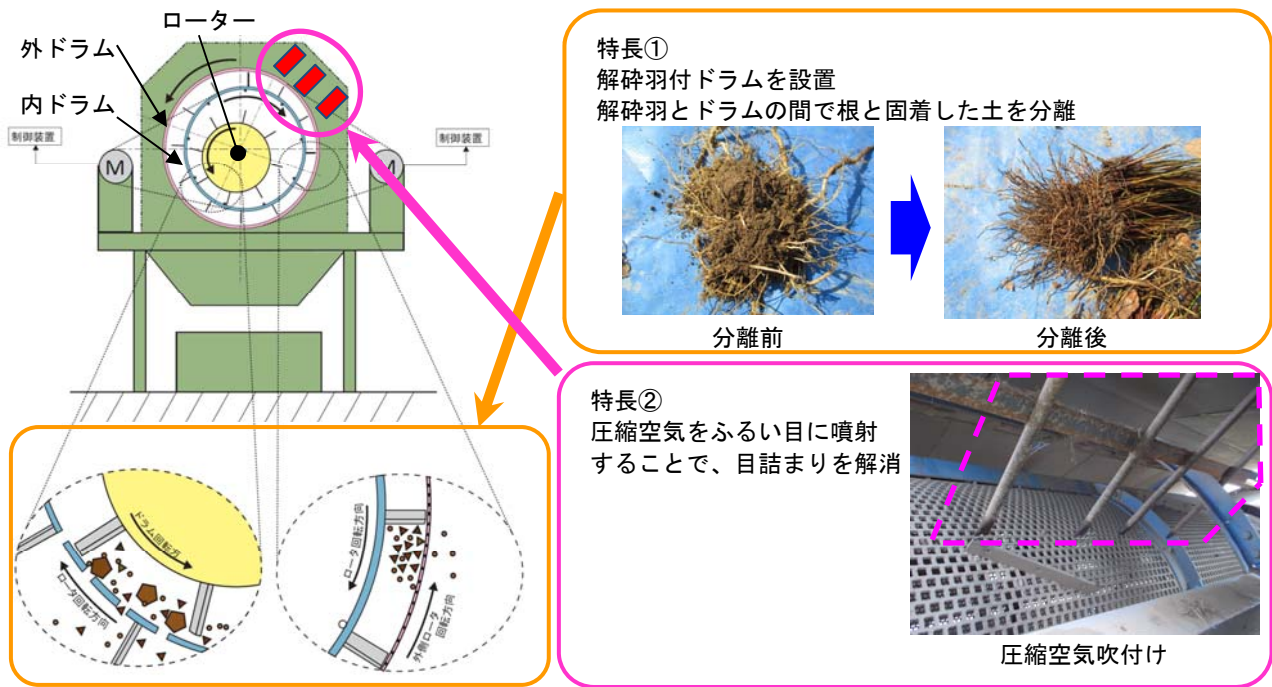


図-4 可燃物分離システムの仕組みと特長

でも、草木の根が残っている状態となっている。したがって、表土の剥ぎ取りで発生する除去土壌には、このような除草物や植物根などの可燃物が混在していることが多い。これらの可燃性の有機物は、除去土壌を閾値 8,000Bq/kg で振り分けるため放射性物質濃度を計測する際、その計測精度を悪化させる原因となる。また、土壌貯蔵施設内でこれらの有機物が腐食することによってアンモニウムイオンが生じ、アンモニウムイオンの作用によって土粒子に固着していた放射性セシウムがイオンとなって溶出することが懸念されている。そのため、除去土壌中の有機物をできるだけ取り除くことが重要と考え、可燃物を機械的に、かつ高精度に分別できるシステム「パワーグラインドスクリーン:PGS」を環テックス(株)と共同開発した。

### 3.1 可燃物分離システムの開発

可燃物分離システムは、図-4 と写真-5 に示すようにトロンメル型の分離装置である。回転方向の異なるローターと網目を持つ内ドラムの間に原土を投入し、ローターに設置されたウレタン製の解砕翼により解砕を行いながら強制的に内ドラム外部へ土壌を排出する。内ドラム外部に排出された土壌は、内ドラム外面に設置された解砕翼により外ドラムとの間でさらに解砕されて外部に排出される。

この可燃物分離システムは、通常のトロンメルと異なり、解砕翼とドラムの中で植物根混じりの土壌を解砕しながら分離を行うため、土壌が根に強く固



(a) ドラム外観





(b) ドラム内部

写真-5 可燃物分離システムの詳細

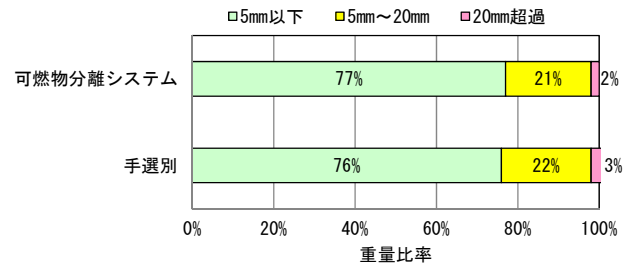
着した植物質についても、土壌と植物質を分別することが可能である。また、圧縮空気をドラムに吹き付ける仕組みを付加し、粘性土に対して目詰まりを起ささないように工夫している。

この可燃物分離システムを用いて除去土壌を 5mm 以下、5mm～20mm、20mm 超の 3 分画に分

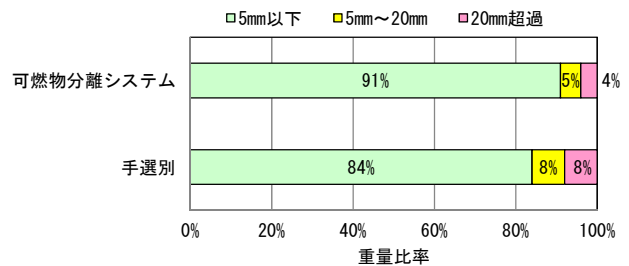
表-2 分離状況の比較

 原土（植物根を多く含む土壌）	
可燃物分離システム	手選別
 5mm 以下	 5mm 以下
 5mm~20mm	 5mm~20mm
 20mm 超過	 20mm 超過

別を行い、外観観察・重量測定を行った。そして、ふるいによる手選別の場合と比較を行った。原土としては植物根を多く含む土壌と、落葉を多く含む土壌の2種類を用意した。ここでは、試験結果として植物根を多く含む土壌の分離状況の比較を表-2に示す。この表の左側が可燃物分離システムによる分離状況を示しているが、植物根から土壌が手選別と同様に分離されていることが分かる。また、両土壌の各分面の重量測定結果を図-5に示す。これにより可燃物分離システムの各分面の重量比も手選別とほぼ同じであることが分かる。これらの結果から、可燃物分離システムの分離性能は、手選別と同等であることが確認された。



(a) Case1(植物根を多く含む土壌)



(b) Case2(落葉を多く含む土壌)

図-5 各分面の重量比の比較



写真-6 可燃物分離システムの実機

### 3.2 稼働実績

可燃物分離システムは、既に実際の工事に実機展開され、東北地方の災害廃棄物処理において津波堆積物が混じった5万tの土壌から植物根を分離した実績を有している(写真-6 参照)。このときに、25~50t/hの処理能力があることが確認されている。

## 4. セシウム汚染土壌濃度分別システム

中間貯蔵施設には、土壌貯蔵施設(I型)と土壌貯蔵施設(II型)が併設される。I型には8,000Bq/kg以下の除去土壌が貯蔵され、II型には8,000Bq/kg超が貯蔵される。土壌の分別作業時には計測誤差が生じることから、分別設定値を8,000Bq/kgより低い安全サイドに設定することが予想される。そのため、II型への投入量が増えて、コストの増大を招く結果

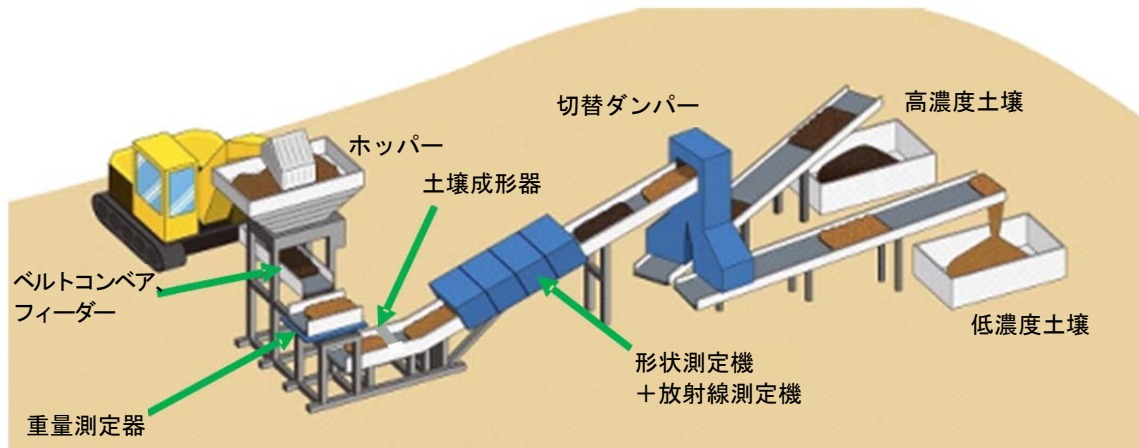


図-6 セシウム汚染土壌濃度分別システムの設備構成

となることから、計測誤差を小さくして、極力分別設定値を下げないことが望まれる。

土壌の含有放射線量の測定では、測定対象土砂の質量と塊の形状を一定に保つ必要がある。これは、放射性物質濃度が同じでも、土壌自体に遮へい効果があることから、比重や形状が変われば計数率の値が異なってくるためである。そのため、従来の分別装置では、こうして生じる計測誤差を排除できず過大・過小評価が懸念されていたことから、分別設定値を 4,000Bq/kg 程度に設定せざるを得ない状況にあった。

そこで、各種汚染土壌の浄化工事や除染工事で培った土壌の取り扱いノウハウなどをベースにしてセシウム汚染土壌濃度分別システム「セシウム土壌ソーター：CSS」を富士電機(株)と共同開発した(図-6 参照)。

#### 4.1 セシウム汚染土壌濃度分別システムの構成

セシウム汚染土壌濃度分別システム(以下、濃度分別システム)は、ベルトコンベア上に構築され、上流側から順に、除去土壌を一塊(0.1~0.3m<sup>3</sup>)のユニットにしてベルトコンベアに供給するフィーダー、ユニットの重量計測器(写真-7)、ユニットの幅を一定に保つライン両脇の仕切り板、ユニットの層厚を15cm程度に均すローラー型の土壌成形器(写真-8)、形状測定機(写真-9)、放射線測定機(写真-10)、設定値に基づきユニットの投入先を変える切替ダンパー(写真-11)で構成されている。

放射線測定機は、外部の空間線量の影響を受けないようにラインを遮へいする鉛製フードの中に設置している。また、成形器をローラー型としたのは、粘性の高い土壌への対応を考慮したためである。粘性の高い土壌に対して板状成形器で成形すると、土壌が波を打つ場合がある。成形状況の比較を写真-

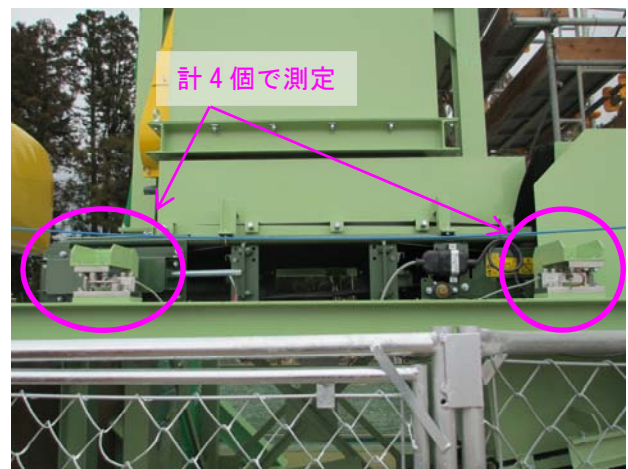


写真-7 重量計測器



写真-8 ローラー型土壌成形器

12に示す。この写真により、ローラー型成形器が良好に機能していることが分かる。

#### 4.2 放射性物質濃度の算定における改善

一般に、放射性物質濃度の計測に必要な主要なパラメータとしては、以下の4項目が挙げられる。

- a) 放射線計数率：土壌に含有される総 Bq 数の算出
- b) 土壌比重：a)から総 Bq 数を算出する際の自己遮へい効果の評価

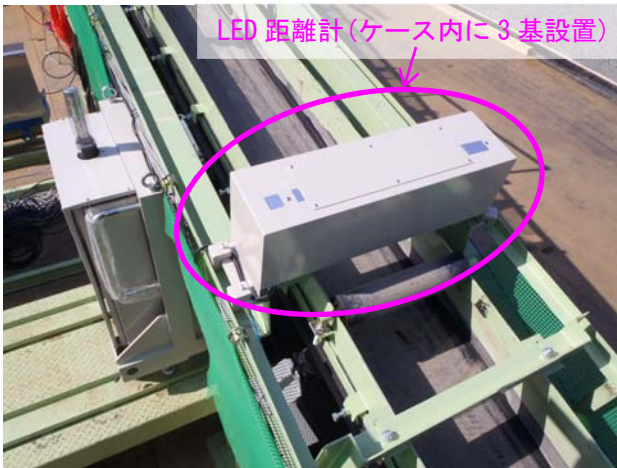


写真-9 形状測定機



(a) 板状成形器



写真-10 放射線測定機



(b) ローラー型成形器



写真-11 切替ダンパー

写真-12 成形状況の比較

重についても、c)の土壤形状測定による土壤体積の算出とd)の土壤重量の計測により、非常に高い精度で比重の把握が可能となっている。

すなわち、他の濃度分別機よりもb)、c)、d)を精度よく計測することで、土壤中の放射性物質濃度が精度よく算定できるようになると考えた。

- c) 土壤形状：a)から総 Bq 数を算出する場合の形状効果の評価
- d) 土壤重量：a)～c)と併用し土壤中の放射性物質濃度(Bq/kg)の算出

a)の放射線計数率の測定機である NaI シンチレータについては、既存の濃度分別機と同程度の精度であり、これ自体には大きな特徴はないが、c)の土壤形状の測定については、LED 測距計により精度の高い計測を可能としている。また、d)の土壤重量については、1 バッチごとにロードセルによる正確な重量測定が可能としている。さらに、b)の土壤比

### 4.3 実証試験

#### 4.3.1 概要

実証試験機は、実機の処理能力の約 1/3 の 30t/h とした。なお、実機の処理能力については 100t/h 程度を想定しているが、この実証機のベルコン幅 30cm を 1m に拡張することで比較的容易に処理能力を向上することが可能と考えている。実証試験機全景を写真-13 に示す。

対象とした土壤は実際の除染工事において発生した除去土壤を使用した。対象土壤は可燃物を粗取りした後、実証試験に供した。そして、この除去土壤を今回開発した土壤濃度分別システムで濃度測定し





写真-13 実証試験機の全景

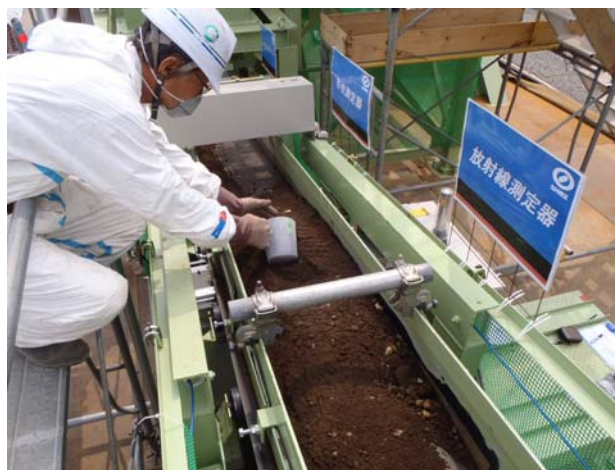


写真-14 サンプルング状況

表-3 実証試験結果

対象土壌	比重	今回開発した濃度分別システムの測定値 (Bq/kg)	ゲルマニウム半導体分析機による測定値 (Bq/kg)	平均誤差 (%)
Case1 農地	ロット1	1.41	3,673	-1.3%
	ロット2	1.41	3,849	
	ロット3	1.38	3,616	
	ロット4	1.38	3,830	
Case2 宅地(庭土)	ロット1	1.41	15,257	-5.2%
	ロット2	1.34	15,472	
	ロット3	1.36	16,503	
	ロット4	1.33	16,687	
Case3 農地	ロット1	1.41	12,080	13.8%
	ロット2	1.43	11,585	
	ロット3	1.41	12,362	
Case4 宅地(庭土)	ロット1	0.95	28,643	6.2%
	ロット2	0.93	28,303	
	ロット3	0.96	26,821	
	ロット4	0.95	29,952	
Case5 道路(砂利混土壤)	ロット1	1.33	8,988	2.3%
	ロット2	1.36	8,393	
	ロット3	1.38	9,775	
	ロット4	1.36	8,712	

た値と、ゲルマニウム半導体検出器で濃度測定した値を比較した。ゲルマニウム半導体分析の検体は、濃度分別システムのベルコン上から、3~4 バッチ(ロット)の土壌から得ている(写真-14 参照)。

#### 4.3.2 濃度測定と試験結果

試験結果を表-3 に示す。この表により、平均誤差は-5.2%~13.8%であり、計測誤差は20%以下と非常に精度が高いことが分かる。また、約3,000Bq/kg~約28,000Bq/kgと濃度が大きく異なる場合にも精度良く測定できていることが分かる。さらに、Case4 では比重が0.9程度、Case1~3では比重1.4程度と広い範囲の土質を計測しているに

も関わらず今回の測定値とゲルマニウム半導体分析値が良く一致していることも分かる。

既存機では比重の値を一定値として入力してしまうことから、Case1~3の比重1.4をCase4の比重として濃度を算定したと仮定すると、比重の相異分50%程度(1.56≒1.4/0.9から推定)の誤差を生じさせてしまうと考えられる。一方、この濃度分別システムでは比重を非常に正確に算定しているため、Case4の誤差は6.2%に留めることができたと考えている。

#### 5. おわりに

中間貯蔵施設の前処理工程に必要な技術を開発し



写真-15 公開実証の見学状況

て、以下のような結果が得られた。

- 大型土のう袋から除去土壌を取り出すためにウォータージェット破袋システムを開発し、300t/hの処理能力があることを確認した。
- 除去土壌中の可燃物を分離するために可燃物分離システムを開発し、手選別と同等の分離能力があることを確認した。
- 除去土壌を放射性物質濃度で分別するためにセシウム汚染土壌分別システムを開発し、計測誤差 20%以下と既存機よりも測定精度を向上させることができた。

本稿で紹介した中間貯蔵施設対応の前処理3技術については、平成26年4月に公開実証を行い、マスコミや環境省等、多くの見学者に見て頂いた(写真-15 参照)。すなわち、ウォータージェット破袋システムによって大型土のう袋を破袋して除去土壌を取り出し、可燃物分離システムによって混入している植物根等の可燃物を分別した後、濃度分別システムで8,000Bq/kgの閾値によって放射性物質濃度別に分別する、といった一連の前処理技術の実証を確認して頂いた。

今後は中間貯蔵施設のより具体的な計画に合わせて、より実現性の高い前処理技術に完成度を上げていく方針である。

## 謝辞

今回の前処理技術の開発に際して、土木東京支店山口副支店長、嶋田建設所副所長、須々田工事長、村田工事長、小野工事長、坂本工事長、第一土木営業本部渡边上席マネージャー、岩淵主査、江頭主査、土木技術本部鈴木主査、エンジニアリング事業本部高田上席マネージャー、中嶋部長他、非常に多くの方々のご協力を頂きました。また、本開発の一部は、

環境省の「平成26年度除染技術実証事業」の一環として実施したものです。

ここに記して謝意を表します。

## <参考文献>

- 1) 環境省：“除去土壌等の中間貯蔵施設の案について”，2014。
- 2) 環境省：“平成二十三年三月十一日に発生した東北地方太平洋沖地震に伴う原子力発電所の事故により放出された放射性物質による環境汚染への対処に関する特別措置法 基本方針”，2013。
- 3) “中間貯蔵・環境安全事業株式会社法”，平成26年法律第120号，2015。
- 4) (公財)原子力安全技術センター：“平成26年度除染技術選定・評価等業務報告書 ー環境省 平成26年度除染技術実証事業ー”，2015。
- 5) 土田充：“放射性Cs汚染土壌濃度分別装置”，放射性物質対策技術 除去、モニタリング、装置・システム開発，エヌ・ティー・エス，pp.319-326，2015。